

УДК 551.467(571.642)

М.М. Чумаков, К.В. Лужкова

Определение ледовых условий на акватории Охотского моря у восточного побережья о. Сахалин с помощью спектрорадиометрических данных дистанционного зондирования

Ключевые слова:
спутниковый
снимок,
ледяное поле,
ледовые условия,
попынька,
трещины,
спектрорадиометр.

Keywords:
satellite image,
ice floe,
ice conditions,
ice opening,
splits,
spectroradiometer.

Шельф острова Сахалин богат запасами углеводородов, и в настоящее время происходит их активное освоение. Наиболее актуальной задачей на сегодняшний день является разработка нефтегазовых месторождений Киринского перспективного лицензионного участка, находящегося на шельфе восточной части острова. Акватория, на которой располагается этот участок, характеризуется высокой штормовой активностью, а также частой повторяемостью туманов, что делает ее неблагоприятной для навигации даже в безледный период. Однако наибольшую сложность при изучении и освоении данных месторождений составляют тяжелые ледовые условия. В связи с этим нужно получить детальную информацию о характеристиках ледового режима рассматриваемой акватории. Следует отметить, что сбор всех необходимых данных невозможно осуществить только с помощью экспедиций и судовых наблюдений, поскольку это потребует значительных финансовых и временных затрат в силу того, что такие работы должны выполняться в оперативном режиме на протяжении не менее 10 ледовых сезонов [1]. Поэтому для мониторинга ледовой обстановки и определения требуемых при проектировании объектов обустройства характеристик ледового режима должны использоваться спутниковые снимки, в результате обработки которых получают информацию о наличии и типе льда, ширине припая, положении границы дрейфующего льда, скорости дрейфа и размерах ледяных полей.

Спутниковые снимки являются продуктом выполняемого с искусственных спутников Земли (ИСЗ) дистанционного зондирования земной поверхности (ДЗЗ), которое может осуществляться двумя методами. Первый метод – активное зондирование, к которому относится радиолокационная съемка земной поверхности с помощью радара бокового обзора с синтезированной апертурой (РСА). Второй метод – пассивное зондирование, при котором с помощью спектрорадиометра, установленного на ИСЗ, производится измерение электромагнитного излучения земной поверхности в различных спектральных диапазонах.

В настоящее время на сайте NASA размещены данные ДЗЗ за период с 2002 г. по настоящее время, полученные с помощью спектрорадиометров MODIS, установленных на ИСЗ Terra и Aqua. Распространение указанных данных на условиях бесплатного доступа превращает их в важнейший (с учетом их пространственно-временного покрытия) информационный ресурс при проведении исследований, направленных на определение режимных характеристик, а также оценку ледовой обстановки на интересующей акватории. В связи с этим обстоятельством следует подробнее проанализировать состав предоставляемой на сайте NASA информационной продукции.

Все данные непрерывных наблюдений, выполняемых с помощью спектрорадиометра MODIS, представлены в отдельных информационных массивах (гранулах), объединяющих данные сканирования земной поверхности, полученные в течение 5 мин пролета ИСЗ и таким образом покрывающие территорию $\sim 2330 \times 2000$ км. Сканирование производится с помощью 490 детекторов, которые измеряют электромагнитное излучение в 36 спектральных диапазонах, охватывающих видимую и инфракрасную области спектра. Необходимо отметить (см. таблицу), что лишь в диапазоне 1 и в диапазоне 2 пространственное разрешение детекторов составляет 250 м.

Диапазоны спектрорадиометра MODIS

№ диапазона	Средняя длина волны, мкм	Пространственное разрешение, м	Ширина диапазона, мкм	№ диапазона	Средняя длина волны, мкм	Пространственное разрешение, м	Ширина диапазона, мкм
1	0,645	250	0,050	19	0,94	1000	0,050
2	0,858	250	0,035	20	3,75	1000	0,180
3	0,469	500	0,020	21	3,96	1000	0,059
4	0,555	500	0,020	22	3,96	1000	0,059
5	1,240	500	0,020	23	4,05	1000	0,061
6	1,640	500	0,0246	24	4,47	1000	0,065
7	2,130	500	0,050	25	4,52	1000	0,067
8	0,412	1000	0,015	26	1,375	1000	0,030
9	0,443	1000	0,010	27	6,72	1000	0,360
10	0,488	1000	0,010	28	7,33	1000	0,300
11	0,531	1000	0,010	29	8,55	1000	0,300
12	0,551	1000	0,010	30	9,73	1000	0,300
13	0,667	1000	0,010	31	11,03	1000	0,500
14	0,678	1000	0,010	32	12,02	1000	0,500
15	0,748	1000	0,010	33	13,34	1000	0,300
16	0,869	1000	0,015	34	13,64	1000	0,300
17	0,905	1000	0,030	35	13,94	1000	0,300
18	0,936	1000	0,010	36	14,24	1000	0,300

Измерения, относящиеся к одной грануле, записаны в нескольких HDF-файлах [2], которые также содержат необходимые для их использования метаданные.

Помимо указанной информации на сайте NASA представлены спутниковые снимки, которые построены для каждой гранулы и представляют собой синтезированные RGB-изображения. Однако у этих изображений отсутствуют географическая привязка и коррекция, что существенно затрудняет их непосредственное использование в процессе исследований ледяного покрова. Также на сайте для многих районов земного шара имеются геолокализированные спутниковые снимки за отдельные годы, начиная с 2008 г., при построении которых использовались данные всех гранул за соответствующий день. Эти снимки могут быть использованы для получения некоторых пространственных характеристик ледяного покрова (например, ширины припая), но с их помощью невозможно определить скорость дрейфа ледяных полей.

Следовательно, для построения спутниковых снимков, пригодных для использования в целях определения режимных характеристик ледяного покрова на изучаемой акватории, необходимо разработать и применять методику генерации синтезированного RGB-

изображения непосредственно по данным измерений, выполненных с помощью спектрорадиометра MODIS.

Методика генерации спутниковых снимков непосредственно по данным MODIS

Следуя методике, приведенной в [3], для построения снимка в видимом свете используются данные об электромагнитном излучении, полученные в диапазонах 1, 4 и 3 (645, 555, 469 нм соответственно), т.е. интенсивности излучения в красной, зеленой и синей частях спектра видимого света подставляются на место первого (RED), второго (GREEN) и третьего (BLUE) каналов генерируемого RGB-изображения. Однако такой снимок малоприменим для определения параметров ледяного покрова, поскольку ледяной покров и многие формы облачности могут быть неотличимы друг от друга. Поэтому при проведении исследований ледяного покрова широкое применение нашли снимки, представляющие собой синтез излучений в видимой части спектра и его инфракрасной области. На практике активно используются снимки, представляющие собой RGB-изображения, сгенерированные по величинам излучения в 3-м, 6-м и 7-м диапазонах. На таких снимках регионы, покрытые снегом или льдом, будут окрашены в оттенки

красного цвета, поскольку лед и снег обладают большой отражательной способностью в синей части спектра видимого света, а его излучение в инфракрасной области (диапазоны 6 и 7) весьма малó. Облака хорошо отражают во всех этих диапазонах и, следовательно, на снимке будут иметь белую окраску.

Тем не менее, существенным недостатком вышеописанных снимков является их относительно невысокое пространственное разрешение, которое в силу особенностей используемых детекторов (см. таблицу) не может быть меньше 500 м/пиксель. Следует отметить, что размещенные на сайте NASA синтезированные снимки, использующие диапазоны 3, 6, 7 с разрешением 250 м, получены путем интерполяции [4] и, следовательно, не несут дополнительной информации об особенностях рельефа ледяного покрова.

Учитывая технические характеристики детекторов спектрорадиометра MODIS, для генерации снимка с истинным пространственным разрешением, равным 250 м, необходимо использовать данные измерений, выполненных в диапазонах 1 и 2. Диапазон 1 принадлежит видимой части спектра, а диапазон 2 находится в близкой инфракрасной области, и в светлое время суток его данные отражают в большей степени видимое излучение.

Если при генерации снимка, использующего RGB-представление (красный–зеленый–голубой), на место второго (GREEN) и третьего (BLUE) каналов подставить данные с детекторов диапазонов 2 и 1 соответственно, а на место первого канала (RED) – данные диапазонов 6 или 7, то регионы, покрытые снегом или льдом, будут окрашены в оттенки голубого цвета. Чем больше льда, тем больше абсорбция в коротковолновой части инфракрасного диапазона (1652 и 2155 нм) и, следовательно, большая яркость голубого цвета присутствует в окраске региона. Морская вода будет выглядеть на снимке очень темной, почти черной, поскольку хорошо поглощает во всех используемых диапазонах. Таким образом, комбинация этих длин волн позволяет надежно выделять регионы, покрытые снегом или льдом, и за счет высокого пространственного разрешения детекторов видимого диапазона хорошо отражает неоднородности ледяного покрова.

Необходимо отметить, что снимки, выполненные в диапазонах 7, 2, 1, применялись при

исследованиях ледового режима различных акваторий [5–7].

Технологический процесс генерации спутниковых снимков состоит из следующих этапов:

1) для исследуемого региона определяют моменты времени, когда производилась съемка с ИСЗ Terra или Aqua;

2) просматривают все образцы снимков и выбирают по возможности тот, на котором интересующий регион расположен в центре снимка и не закрыт облаками;

3) для выбранного снимка производят с сайта NASA загрузку данных спектрорадиометра, которые хранятся в виде HDF-файлов. Объем загружаемых данных составляет около 350 МБ;

4) с помощью программного обеспечения, предоставляемого на сайте NASA, производят генерацию трех файлов в формате GEO-TIF, в которых в графической форме содержатся геолокализованные значения электромагнитного излучения в соответствующих диапазонах.

5) используя инструментарий геоинформационной системы (ГИС), например ArcInfo, из трех ранее полученных GEO-TIF-файлов генерируют снимок в RGB-представлении;

6) настройкой гистограммы цветности каждого цветового канала (RED, GREEN, BLUE) производят коррекцию изображения в соответствии с рекомендациями, изложенными в работе [8].

Анализ спутниковых снимков шельфа о. Сахалин

С целью определения режимных характеристик ледяного покрова на акватории шельфа Сахалина создан электронный архив, содержащий около 200 снимков, сгенерированных по данным спектрорадиометрической съемки за период с 2007-го по 2014 г. На рис. 1 приведен сгенерированный снимок за 09 февраля 2008 г., отражающий характерную для этого времени года высокую (9–10 баллов) сплошность дрейфующего льда на исследуемой акватории.

По данным снимка, приведенного на рис. 1, с помощью инструментария ГИС можно определить, что припай простирается вдоль всего восточного побережья острова, однако его ширина составляет не более 1,5 км. Залив Терпения практически свободен ото льда – отчетливо видна открытая вода, отображаемая

на снимке черным цветом, тем не менее южнее и мористее (дальше от берега) наблюдается дрейфующий лед, который выносится под воздействием квазистационарного и приливного течения, а также преимущественных ветров от восточного побережья Сахалина к острову Хоккайдо.

На рис. 2 изображен сгенерированный снимок за 26 февраля 2008 г., отражающий процесс образования ниласа и молодого льда в заприпайной полынье.

Учитывая, что более светлые оттенки голубого цвета на снимке соответствуют большей толщине льда, анализ цветности ледяного покрова позволяет сделать вывод о том, что на исследуемой акватории наблюдался дрейф ледяных полей, толщина которых составляла более 1 м. Максимальный размер ледяного поля, зафиксированный в этот день, составил $10,0 \times 6,1$ км. Сплоченность льда на рассматриваемой акватории достигала 7–8 баллов.

В целях определения среднесуточной скорости дрейфа ледяных полей, которые могут представлять угрозу надводным объектам устройства Киринского месторождения, были сформированы серии последовательных снимков, по которым возможно надежно идентифицировать траектории перемещения гигантских (более 10 км в поперечнике) ледяных полей. На основании пространственно-временных данных о траекториях перемещения ледяных полей были рассчитаны среднесуточные значения скорости их дрейфа. Максимальная зафиксированная на акватории месторождения среднесуточная (24–25 февраля 2014 г.) скорость дрейфа гигантского ледяного поля (длина – 36 км, ширина – 13 км) составила 35 см/с (рис. 3).

По данным спутникового снимка (см. рис. 3), дрейф этого гигантского ледяного поля происходил при общей сплоченности льда, достигавшей 9–10 баллов. При этом согласно данным гидрометеостанции «Комвро» ветер был очень слабым, что позволяет сделать вывод о том, что такая высокая скорость дрейфа была индуцирована исключительно квазистационарным течением (Сахалинское течение), наблюдаемым у восточного побережья острова.

При анализе сгенерированных снимков за период 2007–2014 гг. установлено, что на весенних снимках, примерно с середины апреля до начала мая, вдоль всего восточного побережья острова Сахалин идентифицируется

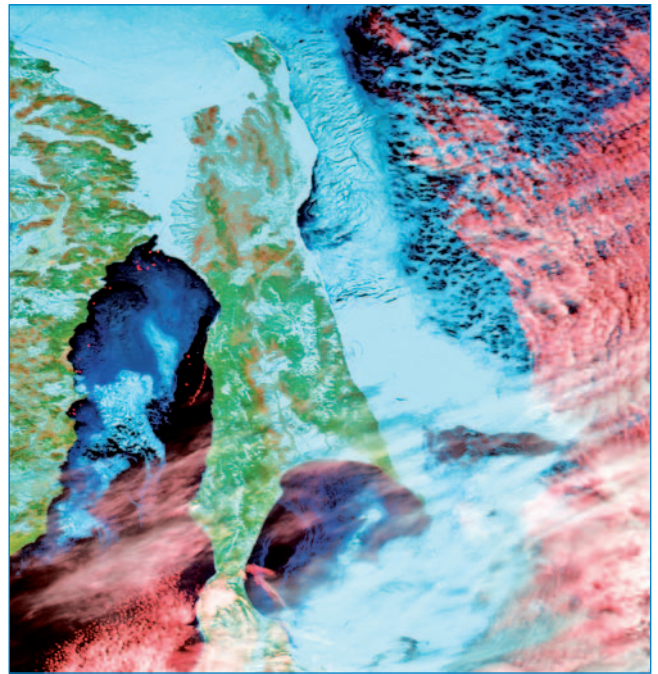


Рис. 1. Спутниковый снимок, сгенерированный по данным MODIS на ИСЗ Terra, отражающий ледовую обстановку у берегов Сахалина 9 февраля 2008 г.

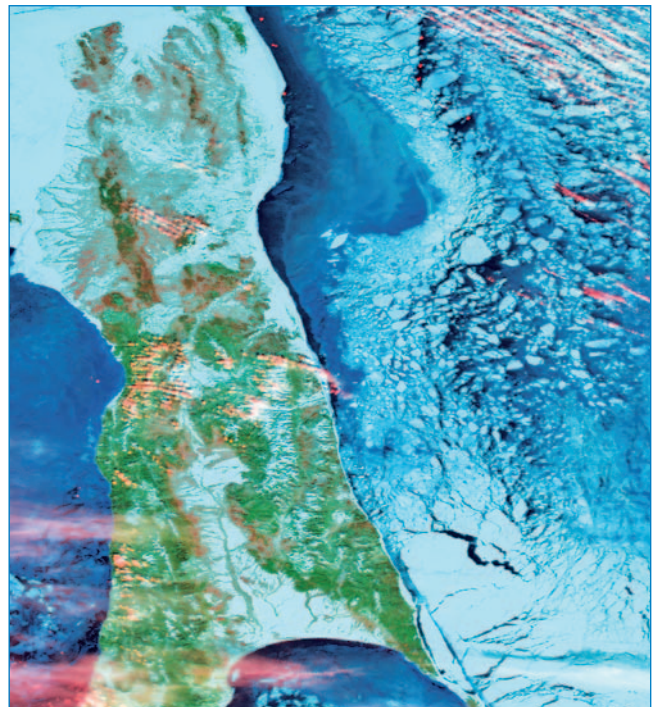


Рис. 2. Спутниковый снимок, сгенерированный по данным MODIS на ИСЗ Terra, отражающий ледовую обстановку у берегов Сахалина 26 февраля 2008 г.

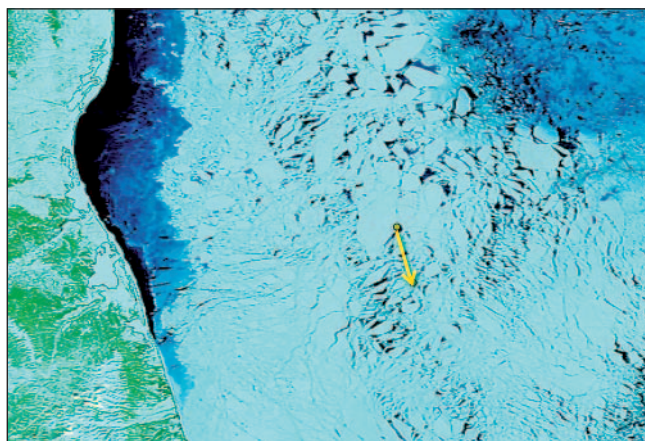
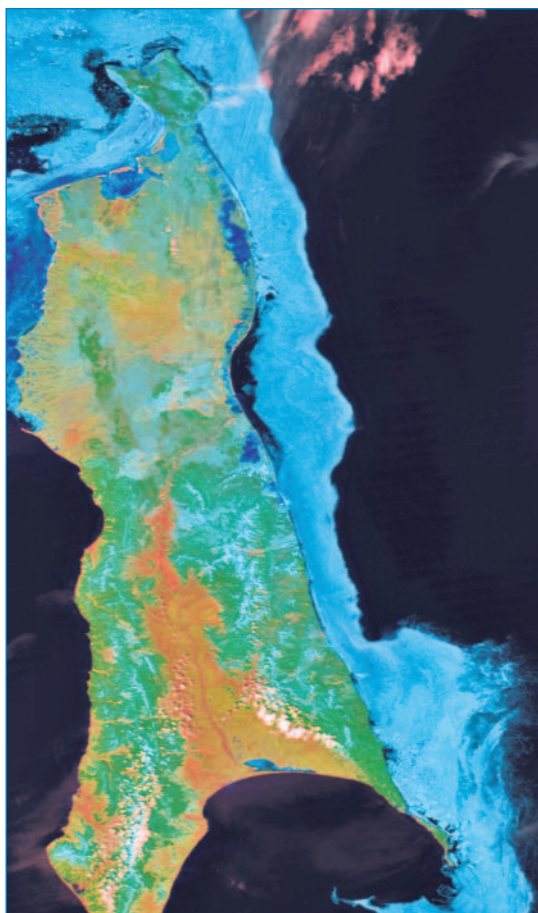


Рис. 3. Спутниковый снимок, отражающий ледовую обстановку на акватории Киринского месторождения 25 февраля 2008 г.: стрелка обозначает вектор смещения краев гигантского ледяного поля за 24 ч

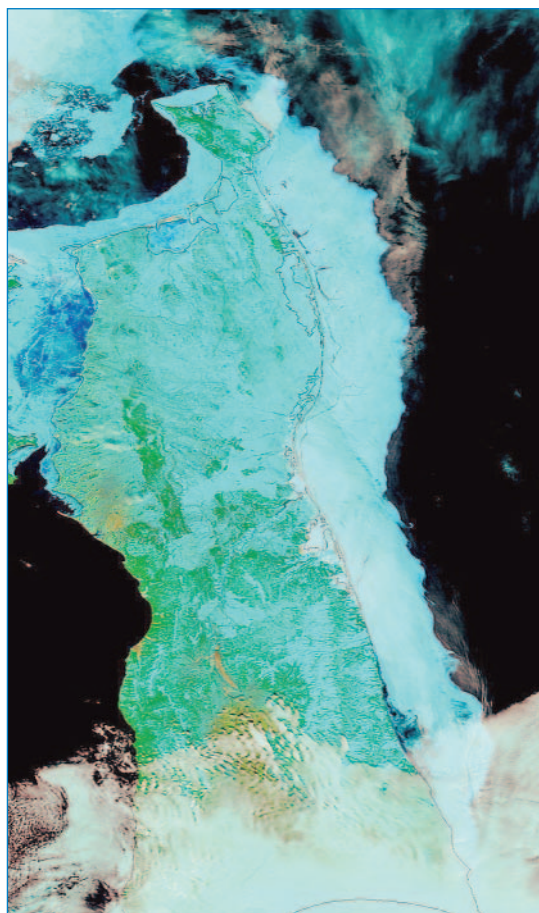
такое опасное природное явление, как ледовая река (рис. 4). Появление ледовой реки связано со вскрытием льда на реке Амуре и вы-

носом под воздействием стокового течения и циркуляционных течений Амурского лимана и Сахалинского залива мелкобитого и тертого пресноводного льда к мысу Елизаветы. Здесь лед смешивается с ледяными полями из северо-западной части Охотского моря и под воздействием Сахалинского течения начинает дрейфовать на юг вдоль восточного побережья.

Ширина образующейся ледовой реки составляет около 40 км, что позволяет ей полностью покрывать акваторию Киринского перспективного лицензионного участка сжатым крупнобитым, мелкобитым и тертым льдом сплоченностью 9–10 баллов. Столь высокая сплоченность, степень сжатия и наличие сплоченной кромки льда определяются, по-видимому, переходом в этот период атмосферной циркуляции к летнему муссонному типу, который характеризуется преобладанием ветров южных и юго-восточных направлений, а также наличием устойчивого круговорота вод вдоль восточного побережья острова.



а



б

Рис. 4. Спутниковые снимки, отражающие ледовую обстановку у берегов Сахалина (слева – 11 мая 2007 г., справа – 12 мая 2010 г.), определяемую ледовой рекой

Таким образом, в результате анализа сгенерированных снимков за период 2007–2014 гг. определены следующие особенности ледового режима акватории Киринского перспективного лицензионного участка, учет которых необходим при проектировании обустройства и оценке соответствующих рисков:

- высокая сплоченность льда (9–10 баллов) в течение всего зимнего периода;
- кромка дрейфующего льда в отдельные месяцы располагается на расстоянии до 150 км от восточного берега Сахалина;
- главная особенность ледового режима у восточного побережья острова – незначительная ширина припайного льда, составляющая в среднем порядка 1,5 км. Максимальная зафиксированная ширина припая – 4 км (17 февраля 2010 г.);

- в весенние месяцы наблюдается такое опасное природное явление, как ледовая река.

При этом следует учитывать, что при современном уровне развития методов ДЗЗ для точного определения параметров ледяного покрова (толщины льда, морфометрических характеристик ледяных образований и максимальной скорости их дрейфа), от величины которых существенно зависит уровень ледовой нагрузки, одних только данных спутниковых снимков недостаточно. Поэтому в целях исследования ледового режима акватории Киринского перспективного лицензионного участка наряду со сбором и анализом данных ДЗЗ необходимо провести серию ледовых экспедиций, в рамках которых должны быть выполнены полевые инструментальные наблюдения за ледяным покровом и обобщены их результаты.

Список литературы

1. Guide of Climatological practices. – Geneva: WMO, 2011. – № 100.
2. Barbieril R. Draft of the MODIS level 1B algorithm theoretical basis document version 2.0 [ATBMOD – 01]: SAIC/GSC MCST Document / R. Barbieril, H. Montgomery, S. Qiu, B. Barnes, D. Knowles Jr., N. Che, I.L. Goldberg. – 1997. – February 13. – 70 p.
3. Gumley L. Creating reprojected true color MODIS images: tutorial. Version 1.0.2 / L. Gumley, J. Desclotres and J. Schmaltz. – 2010. – January 14.
4. Franz B.A. MODIS land bands for ocean remote sensing applications / B.A. Franz, P.J. Werdell, G. Meister, E.J. Kwiatkowska, S.W. Bailey, Z. Ahmad, C.R. McClain // Proc. Ocean Optics XVIII, 9–13 October 2006. – Montreal, Canada, 2006.
5. Чумаков М.М. Методика обработки спутниковых снимков высокого разрешения для оценки характеристик ледового режима и влияния изменчивости ледяного покрова на динамику вод северного Каспия / М.М. Чумаков, О.И. Зильберштейн, А.Л. Лобов и др. // Труды Международной конференции «Освоение шельфа арктических морей» (RAO/CIS Offshore 2007). – СПб., 2007.
6. Лужкова К.В. Определение характеристик ледяного покрова на акваториях западной части Карского моря и Обско-Тазовского региона по радиолокационным и спектрорадиометрическим данным дистанционного зондирования Земли / К.В. Лужкова, М.М. Чумаков // Вести газовой науки: Современные подходы и перспективные технологии в проектах освоения нефтегазовых месторождений российского шельфа. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2013. – № 3 (14). – С. 113–118.
7. Наумов М.А. Идентификация зимних подвижек припая и разработка расчетного сценария воздействия примерзших ледяных полей на морскую платформу для условий Обской губы / М.А. Наумов, Д.А. Онищенко, М.М. Чумаков // Труды конференции ROOGD-2012. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2012. – С. 480–493.
8. Vermote E.F. Atmospheric correction algorithm: spectral reflectances (MOD09). Version 4.0 / E.F. Vermote, A. Vermeulen / NASA contract NAS5-96062. – April 1999.